

课题完成单位：化工与化学学院

完成人：吴晓宏，姜兆华，姚忠平，李均，王群，卢松涛，李杨

理学和工学交叉融合的 科技领军人才培养模式研究与实践

课题来源：校级2021年重点研究课题

新时代呈现知识生产多元性、跨学科性和协同创新等特征，不同学科的相互渗透、交叉和综合已成为当今学科发展的一个主要驱动力，工科院校理科人才培养机制急需结合时代发展改革创新、与时俱进。以哈尔滨工业大学化学学科为载体，在二十年的建设和教学实践中，对接国家航天重大战略需求，探索出了独具航天国防特色、与一流专业相适应“三位一体，多维融合”的多学科交叉融合的“大化学”的理科专业培养模式，对其形成过程、内涵、模块化知识体系构建、注重“交叉与前沿”，“三导三实”跨界整合能力培养特色和新型工程实践教学进行了系统研究和实践。

关键词

理科，工科，交叉融合，人才培养



近年来，前沿科学问题和全球性挑战趋向复杂，从科技创新与学科关系来看，单一学科的知识、方法、工具等已不足以获得重大科学突破。重大突破性原创性成果、国家重大战略和国计民生问题的解决大都是学科前沿和多个学科高度交叉融合的结果。2020年，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出，要“加强基础研究、注重原始创新，优化学科布局和研发布局，推进学科交叉融合，完善共性基础技术供给体系”。显然，强化学科交叉融合，促进复杂科学技术问题的多学科协同攻关，是当前科学技术发展的重大特征，是经济社会发展的内在需求，是培养创新型人才的有效路径^[1]。强大的理科基础科学研究是建设世界科技强国的基石，而人才是创新的原动力和主体，培养人才是大学的核心使命，高水平人才培养体系是未来的一个时期我国高等教育改革发展的核心任务。因此，高校迫切需要转变培养理念、目标、模式、方法，构建服务国家战略需求的未来学科交叉型理科拔尖创新人才教育教学体系。

学科、专业是人才培养的基础和载体，学科是就知识体系而言，而专业是指就社会分工而言。学科是一流大学的“细胞”，是知识生产、传播、应用积累到一定阶段的产物，即主体在认识客体的过程中形成的系统有序的知识体系，是科学研究、队伍建设、人才培养、社会服务及文化传承创新的综合平台，向社会提供科研成果；专业是人才培养的基本单元，是人才培养目标、方案、课程、教材、实践等各项工作的载体和依托^[2,3]。

1. 我国传统单一科学范式下的理科培养

目前，我国传统理科教育过分强调基础理论传授与专业知识的系统化，传统单一科学范式下的理科培养理念和实际脱节。一方面，传统唯学术化建设范式以知识产出为目的，学术研究围绕学科展开，而非围绕国家和社会需求，无法将理论知识与实际应用融通，学术研究的学科知识深度发展和国家与社会需要的问题解决系统性要求之间的矛盾处于非对称状态，降低了学术研究成果的社会意义和实际功能^[2,3]。另一方面，社会的专业化分工导致科学研究采取“分科治学”，各学科划分精细，相互独立、彼此分离，教育模式存在专业设置狭窄、偏重单一学科的系统化与专业化等问题，往往过于强调专业和细节，学生的知识和思维容易局限在专业空间里，不合理的知识结构导致学生的创新思维受限，不能满足大科学时代对人才培养的要求，亟需打破学科壁垒，通过知识的交叉或会聚形成符合新时代需要的新学科发展范式，真正实现多学科的知识交叉融合，重构跨界融合的多元知识体系，形成若干学科相互渗透、多元主体联合攻关的思路，解决学科与国家社会隔离问题。2021.5.28，习近平在中国院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的讲话提到：“基础研究要勇于探索、突出原创...。基础研究更要应用牵引、突破瓶颈，从经济社会发展和国家安全面临的实际问题中凝练科学问题，弄通“卡脖子”技术的基础理论和技术原理。”这对我国高等教育的理科人才培养指明了方向。

2. 国外理科培养需借助工程范式理念

近25年来诺贝尔奖中接近50%的成果是通过学科交叉合作取得的，往往不是单一学科、单一方式就能完成的，需要多元整合与跨学科的研究。学科交叉研究已取代传统的单学科研究，成为这个

科学时代新的研究范式。当今社会的知识生产模式正在发生转型，1994年，英国学者吉本斯(Michael Gibbons)等明确提出了两种知识生产模式^[4]。“模式1”是以理论产出为宗旨，而“模式2”则是以面向情境的跨学科研究为重要特征，以实用产出为依归，更加建立在跨学科、多样化的基础上，更加以科学工程技术问题为导向。

工程教育范式泛指整个工程学科和体系，适应当前发展的工程教育范式的转变是工程教育从理念、模式、课程、方法、内容、标准等各方面的系统性和根本性变革，对现代工程、学科、科研、工程教育等的全新理解^[5-7]。理科训练对于提高学生的理论思维能力，有着不容忽视的潜移默化的作用，而这种能力对于发挥探索和创造精神是不可缺少的。理科和工科的相互结合非常必要，人才培养应该使学生掌握最先进知识包括自然科学、数学、工程科学、人文社科多方面的知识，综合能力包括应用所学知识解决实际工程问题、工程创造创新创业能力、团队、沟通交流和领导能力、终身

03

研究的主要内容

世界一流学科的成长史都是一部波澜壮阔的知识演进与组织创新史，学科也是一个“生命体”，是随着知识发展的水平而不断演进的，分为“生成—成长—成熟—蜕变”四个基本阶段。航空航天技术是衡量一个国家综合实力的指标，我国明确提出强化发展“空天科技”。飞行器发展要求使用众多具有先进性能的结构材料和具有电、光、热和磁等多种性能的功能材料，化学为航空航天技术提供了创造新物质、新材料的重要手段，起到了强有力的材料支撑和保障作用，但关键战略材料受制于人已成为制约国家经济社会发展和安全的瓶颈问题之一，我国航天材料的基础研究与应用基础研究面临严峻挑战。

1. 学科建设与专业建设关联性

高等教育的学科划分和高校以学科为基础的专业设置，是现代大学的立学之本。学科是“源”、专业是“流”，专业建设是提升人才培养质量着力点，专业发展主要动力是学科间交叉渗透，如图1。与西方相比，专业是一个有中国特色的概念，我国大学存在专业建设和学科建设、人才培养和科学研究相互割裂、失衡甚至对立，关键要素难以融合，结合深度没有起到相互支撑和促进作用，存在“两张皮”问题，即学科资源没有充分转化为本科教育资源；学术队伍没有全面转化为高水平的教学队伍；科研优势没有有效地转化为教学优势，影响创新人才的培养^[8-11]。

从这一维度来看，学科专业交叉发展思想的渗透与实施成为关键性条件，学科专业优质资源共享是有效地解决高校学科建设与专业建设之间的矛盾与冲突，如图1。以学科建设为重要支撑，以高素质教师队伍为依托，以专业建设为主要载体，以优质课程建设为核心要素，将知识创造与知识传播有机结合，形成“学科+专业+课程”的一体化效应，才能不断夯实一流人才培养体系内涵。

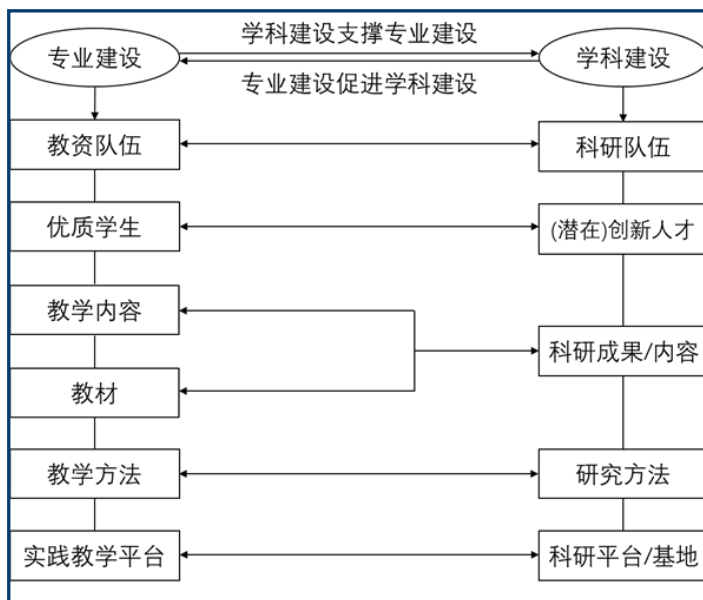


图1 专业建设和学科建设关键要素的协同

2.学科办专业定位的思考

学科的生长发育和发展有阶段性和规律性，从知识生产的视角看，学科的根本任务解决“问题”的过程就是创造新知识，不再局限于某一个狭小的“鸽笼式”的学科空间，而需要多学科汇聚解决问题。在1983年方案的基础上，经3次调整，我国现设13个学科门类，110个一级学科，学科分类的基本格局始终保持稳定，局部微调以适应学科和社会发展的需要，教育部公布的学科门类中没有材料化学的具体归属^[12]。2021年1月14日，教育部新增交叉学科作为第14个学科门类，国家自然科学基金委正式成立交叉科学部，目的之一是面向物质科学领域，基于数、理、化等基础学科的交叉科学研究，解决信息、生命、材料、能源、环境等领域的核心基础科学问题，培养出解决制约我国产业发展的“卡脖子”问题急需的创新型人才。新材料是支撑现代制造业的物质基础，一代材料决定一代技术。新材料自主创新能力离不开新物质结构、精细化合成工艺以及对新奇物理特性的深入理解，因此化学、物理、化工等学科多元理论知识融合是新材料开发缺一不可的源动力。材料化学源于化学与材料学科的基础交叉，致力于在原子/分子“小尺度”下凝练并解决系列重大基础科学问题，为发展变革性和战略性材料体系奠定科学基础，为新产业孕育和发展提供物质基础，是医学、国防等科技领域中不可或缺的先导学科。



哈工大化学学科始于20世纪30年代，是当时机、电、仪、化四大主干学科之一。从2001年起，聚焦思考专业要办出特色，在全国占有一席之地，就必须正确定位。对高水平研究型大学而言，要综合统筹优化学科布局结构，必须坚持扶“强、优、特”，尤其要把学校传统的优势学科专业做强，把国家战略急需的学科专业做精，瞄准国家重大科技前沿和关键领域，推进学科专业体系调整^[12,13]，加快培养善于攻克“卡脖子”技术的人才。

04

研究理论成果及实践措施

当下，面对多学科交叉融合大趋势，专业能否跟随产业发展而进行科学动态调整，是院校内涵建设的基本逻辑起点^[14]。化学学科面向国际前沿，立足航天与国防优势，践行“规格严格、功夫到家”校训，确立“专业建在学科上”的办学思路，注重理工结合与学科交叉，围绕着“我国航天化工特色的理科人才培养”这一中心，基于“大学科”理念，通过材料、化学、物理及化工四个学科的交叉融合，构建基于学科交叉型理科拔尖创新人才的跨界融合的多元知识体系和集成创新能力培养体系。

高等教育高质量的根本与核心是人才培养质量，专业、课程、教材和技术是新时代高校教育教学的“新基建”。把学科和专业中密切相关的师资、学生、课程、平台等关键要素协同起来，以高水平教学体系建设为抓手，积极培育学科新增长点，科教协同育人，实现优势资源共享。根据人才培养目标：一、学科专业建设强调“融合发展”，推动组织跨界融合的多元知识体系，强调“精密耦合”，以“全链条”、“个性化”为目标，打造核心知识课程体系和应用模块课程；进行教学方法、课内外教学联动、考核评价等多维化和综合化课程教学改革；二、探索以问题为导向的学科交叉人才培养模式，深化产教融合，制定个性化培养方案，建立学科交叉型理科人才集成创新能力的

培养体系；三、以学科重大理论和实践应用问题为牵引，促进空间表面材料化学与技术向更多学科渗透融合，组建跨院系的学科交叉型队伍，研究形成群体效应的团队运行机制，如图2。

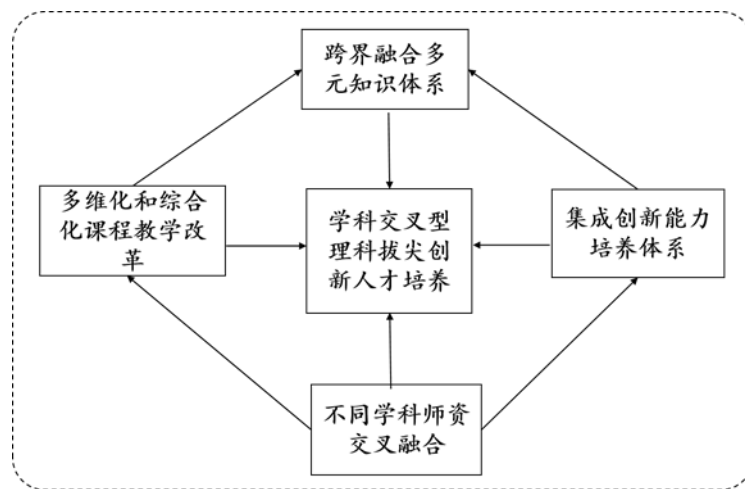


图2 学科交叉型理科拔尖创新人才培养体系的具体框架思路

1.制定专业培养方案及构建跨界融合的多元知识体系，解决不合理的知识结构和创新思维受限难题

立足于本校学科资源，以多学科交叉提供的优质课程组合形成完整的理科培养方案，达成培养目标。树立“大学科”理念，交叉融合材料、化学、物理及化工四个学科，围绕着培养目标所需要的知识结构，保持通识课程及素质教育课程基础上，重点对专业教育的课程进行重新融合，确定培养方案，打造专业基础课程的公共模块和与专业方向对应课程的柔性化模块，构成模块化专业教育课程体系。多学科交叉融合人才培养要求课程结构的调整与优化。注重课程结构的优化和模块化课程的开发，构筑兼容“通识教育课程模块+学科基础课程模块+专业核心课程模块+实习实践课程模块+个性化课程模块”的课程体系，并促使各个培养阶段课程的集群化发展，以模块化课程结构促进不同学科专业领域课程的有效链接和交叉融合。开设材料合成化学、材料物理化学、物质结构分析、应用界面化学、材料基因组学等专业基础课程，形成知识模块。另一方面，为满足学生个性化培养，设定与专业方向对应课程的柔性化模块课程：1) 功能薄膜与器件专业方向课程模块：薄膜材料与器件等课程；2) 能量转化功能材料专业方向课程模块：能量转换材料等课程；3) 智能材料专业方向课程模块：智能材料等课程，构成模块化专业教育课程体系。

作为知识分支与社会需求的结合点，专业建设是课程建设的最终落脚点，课程是学科与专业间联系的中介，课程质量是人才培养的核心要素。复杂工程问题解决过程中的知识形式转化能力涉及对不同领域知识的多重交叉，学生往往需要学习多学科领域的众多知识点，学生对处理问题多次转换、联系与解构能力的培养适合映射在课程群，而不是单纯局限于某一门具体的课程。将知识结构根据培养目标的知识、能力和素质的需要，细化为知识点，制定每门课程的教学大纲，以知识点为标准，让学生对感兴趣的专业方向建立相应的知识逻辑结构，保障教学内容有效性、系统性和前沿性，形成以知识点为构成要素的课程内容体系，集科学，工程，技术学科交叉，围绕材料制备方法、材料表面修饰、材料组分、尺寸控制、材料加工成型等知识点来组织编排，重构材料、化学、物理及化工四个学科跨界融合的多元知识体系。

教材质量是人才培养的主要剧本，要以最强的教授建设好优秀课程，包括编好教材、教案等。材料、化学、物理及化工四个学科教师共同讨论制定每门课程教学大纲，保障教学内容有效性、系统性和前沿性，明确每门课程的知识点子集，由所开设的各门课程的知识点子集的集合形成以知识点为构成要素的课程内容体系。如《物质结构表征》课程，以材料为研究对象，综合运用各类现代

化表征手段，揭示材料的物理、化学特性，为学生开展多学科学术前沿研究和应用探索提供技术支持，其知识点子集主要有原理类如布拉格衍射、光电效应等，方法类如衍射分析、能谱分析等。

结合本校化学化工学科与界面相关的研究成果，特别是材料学科中的表界面知识的应用及世界界面科学的新进展，不断融入硕士研究生的《表面物理化学》和博士研究生的《固体界面物理与化学》，2020年重新出版更名为《应用界面化学》。这是三十多年来与学生的互动实践，多次轮回，随着时代发展，更新知识，剔除旧的、增加新的内容，并在科研中检验，不断提炼出新知识，反哺回到知识传授中，并形成化学、化工、材料和物理学科交叉融合的界面化学知识体系，这个知识体系的形成过程好比于一个知识树的生长过程，图3。



图3 学科交叉融合的界面化学知识体系如一个知识树的生长过程

2. 多维化和综合化课程教学改革

从知识传授为主的传统教学模式，向以立德树人为本的系统化的全人和全面教育模式转变。从单一学科办专业的传统模式，向多院系合作、多学科、跨学科教育转变。创新教学方法，推动教学从知识为主转向能力为主，多种教育学习方式的汇聚融合，打造线上线下学习交互空间，为自主学习、交叉性学习、研究性学习创造更好条件。教师在教学过程中，要有意、有效的对学生进行思想政治教育，提炼专业课程中蕴含的文化基因和价值范式，将其转变为社会主义核心价值观具体化、生动化的有效教学载体，在知识学习中融入理想信念层面的精神指引。通过教师在课堂上引入自身的科研实例启发引导，嵌入现代工程理论知识与工程应用技术，把科技创新教育有关内容渗透到专业课程的教学；学生在课外利用所提供的货架式云课程库等网络资源进行深入自主学习，教师结合学生的个人特点进行课外辅导；从科研立项申请书、具体实施方案制定及实施过程中答疑解惑、结题报告、文章撰写和专利申请等成果梳理全程指导，形成循序渐进的“三导”方式。对于学生从事科研与课程内容直接相关的专业课，实施分类考核的评价方法，将基础知识占比设置为60%，对于另外的40%进行分类考核，如学生自主提出的想法，针对科研任务需要学生自主搭建实验装置、科研任务完成度、专利、论文等类型进行评价。

3. 建立“三实”平台的集成创新能力培养体系

大力开展原始创新，提升基础研究内涵，以应用牵引、突破瓶颈，从国家重大战略实际问题中凝练科学问题，弄通“卡脖子”技术的基础理论和技术原理。面向国家战略需求的多功能材料，在涂层材料方面，发展仿生防污、先进吸波涂层材料的制备技术，揭示极端复杂环境下影响材料物理化学性能的结构要素，发展兼具高承载和多功能特征的使役材料，满足航空航天、核反应堆等高技术领域尖端应用的重大需求；面向绿色能源的功能材料，围绕光、电、热、机械能与化学能之间的高效转化与存储，突破能量转化效率瓶颈，发展新型高性能、高稳定性能量转换与存储材料，为能源技术的变革性发展与应用奠定基础。

通过示范、引导、鼓励等多种方式，调动学生积极性，培养学生多领域知识与技术融合过程中的集成创新性思维能力。在“三导”基础上，依托专业实验室和教师科研设备及场地及相关的重点实验室，工程技术中心，校外实践基地，参与国家重大项目等，构建实训、实践、实战一体化的“三实”平台，如图4，基于该平台学生可形成多学科交叉的创新思维、多学科知识融合的运用能力，对复杂问题进行综合分析并提出有效解决手段的能力，特别是科技攻关实践创新能力。人才培养，激发学生自主创新的积极性是关键。哈工大建立了“多学科导师团队+学生兴趣和特长自主选题”培养模式，实现了选题模式、课题指导和研究及交流的全方位变革。在选题模式上，由过去导师指定到学生结合兴趣和特长自主选题；在课题指导上，由过去‘点对点’、‘一对多’到多学科导师团队的‘多对一’；在课题研究上，主动服务社会需求与国家战略发展，走向工程引导、任务驱动、产品实操，理论基础与工程技术并举、工程应用实质合作，促进学生集成创新能力培养。

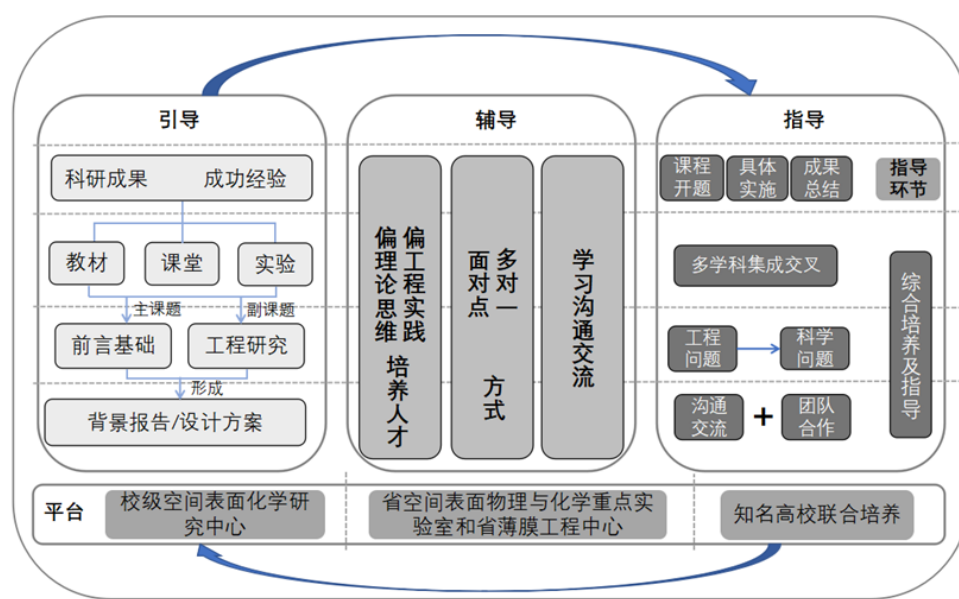


图4 “三导+平台”的个性化培养方式

推进建立“引导、辅导、指导，三导+平台”的集成创新能力一体化培养，通过毕业的师兄师姐亲身讲解完成的课题、成功经验和导师科研成果进教材、进课堂、进实验启发引导学生感兴趣的科学研究，让学生自主选择调研前沿基础和工程研究两个主课题和副课题，并形成背景报告和设计方案，由导师团商议哪个更适合学生，类似种子的选育过程；针对学生的特质，因材施教，提前布局制定培养措施，针对偏理论思维和偏工程动手能力的研究生分别进行“吃小灶”辅导。配备不同学科导师和高年级博士生，实行多对一、面对点的团队指导。从课题开题、具体实施、成果总结，逐渐让学生学会多学科知识集成运用，从工程问题中发现科学问题，在共同解决问题过程中培养团队合作精神，在校级空间表面化学研究中心、省空间表面物理与化学重点实验室和省薄膜工程中心，以及国外知名高校联合培养，这样的高水平科研平台和航天企业实践基地的支持下，在实战过程中培养学生集成知识运用能力与工程实践能力；通过本博一体化培养模式实施长周期培育，对于毕业生做到扶上马，送一程。另外，邀请毕业生回归母校把成长经验传授给下一届新生，启发引导反哺后来者的生态化循环，形成一体化的“三导+平台”个性化培养方式。培养的博士王景风确立了含能材料为自己的研究课题，在读期间即获得凤毛麟角的军科委引领基金项目支持；夏琦兴博士在第25届国际热处理及表面工程联合会大会上获“优秀青年作者奖”；博士卢松涛和李杨毕业后迅速成长为团队的核心成员。发表相关教学研究论文十余篇。

组建化学、材料、物理学科交叉联合导师团队指导学生参加创新创业大赛，刘宸希同学将博士生《3D打印黑体锥用于海水淡化》的课题与创新创业实践性教学过程相融合，从黑体锥表面微观设

计、光吸收理论、光热原理及海水淡化工程实践的角度引发学生理论联系实际的辩证思维和解决实际问题的技术思路，开发实用化的样品，并将产品打入投资、投产商业模式环节中。导师、工程师、学生在遇到外部问题与挑战时相互交流，通过不同的知识积淀、思维方式、处事策略的碰撞与融合，实现“样品-产品-商品”的全面提升，成果发表在化工领域权威期刊《Chemical Engineering Journal》，并转化为教学实验，论文发表在上海交大主办的《实验室研究与探索》，最后该项目获得省“互联网+大学生创新创业竞赛”银牌。

4. 组建学科交叉融合型的师资队伍，建立适应拔尖创新人才培养的团队运行机制，打破教师学科的壁垒，形成群体效应

人才资源是第一资源。由于学生培养是通过每一个教师的具体工作实现的，不同学科的研究对象、方法、思维方式和解决问题的差异性，导致学科内形成了独特的文化，教师们更倾向于封闭在自己的学科领域内，不自觉地形成学科隔阂，使得教师的跨学科视野、能力极为有限。建立跨学科的师资队伍是实现创新拔尖人才培养必不可少的前提，但团队运行机制是关键，该运行机制要促进不同学科教师之间知识互补融合，共同进行科研协同攻关，教学科研双轮驱动培养青年教师保障团队的可持续发展。要求教师的个人科研方向与交叉融合的专业方向一致，在运行机制上，实行带头人负责制，以交叉融合为原则，发挥每位教师自身的学科优势，分工协作、利用多元的学术观点、研究方法及思维方式等优势，形成群体效应。青年教师国际视野宽、学术思想活跃开放，给青年教师压担子，使其树立教学和科研都为人才培养服务的理念，从科研教学两方面进行培养，使其快速融入团队，特别是国外引进青年人才，科研能力强，但缺少教学环节的训练和培养，往往存在着重科研轻教学的问题，通过哈工大“八百壮士”精神传承教育等，使其热爱教育事业，保证团队发展持续性。鼓励教师自主治学，突出教育教学业绩，基于不同学科组建的师资队伍，通过整合，形成协同攻关的能力，强化领跑意识和顶层设计，前瞻性布局，加强“大师+团队”政策导向和激励保障，引领支持更多人才集智攻关，为“天问”等系列航天器储备提供一流的人才队伍，建成具有承担国家重大项目能力的科研创新团队；通过以老带新，共同编写教学大纲、共同备课、共编教材，实现教学上的深度融合。教师队伍建设已形成教学相长、教研融合的教科研生态。师德师风建设贯穿于教育教学的全过程，培养和造就了一支有理想信念、道德情操和丰富学识的优秀教师队伍。

05

推广应用及影响

哈工大化学学科通过近二十年的探索和实践，在专业建设、课程改革和大学生创新能力培养、师资队伍建设等方面积累了丰富的经验和研究成果。目前拥有化学一级学科硕士学位授予权，国家级一流本科专业建设点，共建国家级精品资源共享课1门、国家级教学团队和国家级化学实验教学示范中心各1个。依托课程建设培养青年教师教学能力，相关研究发表在《中国大学教学》、《化学教育》和《大学化学》等杂志上，学科交叉特色突出的化学化工类表面化学课程体系构建及教学改革成果获得黑龙江省高等教育教学成果一等奖，教材《应用界面化学》入选国家十三五重点图书，团队教师发表教学论文20余篇，提供了坚实的理论保障。2016年，已经建成省空间表面物理与化学重点实验室和省功能薄膜材料工程技术中心，将创新平台的建设与人才培养相结合，提倡“以问题为导向”，满足集成创新能力培养，雄厚的国家重大项目科研攻关平台资源奠定了成果基础。学科群体在科技攻关过程中，通过交叉渗透方式实现对空间表界面材料的关键技术突破，获得国家技术发明二等奖1项、国防科学技术发明一等奖1项、教育部技术发明一等奖1项以及省自然科学一等奖1项，深受国内外同行院校肯定和积极应用，取得的成果辐射指导东北高校交叉学科化学人才培养，对我国高校学科交叉材料化学理科拔尖人才培养具有借鉴价值。

参考文献略